

1. INTRODUCCIÓN.

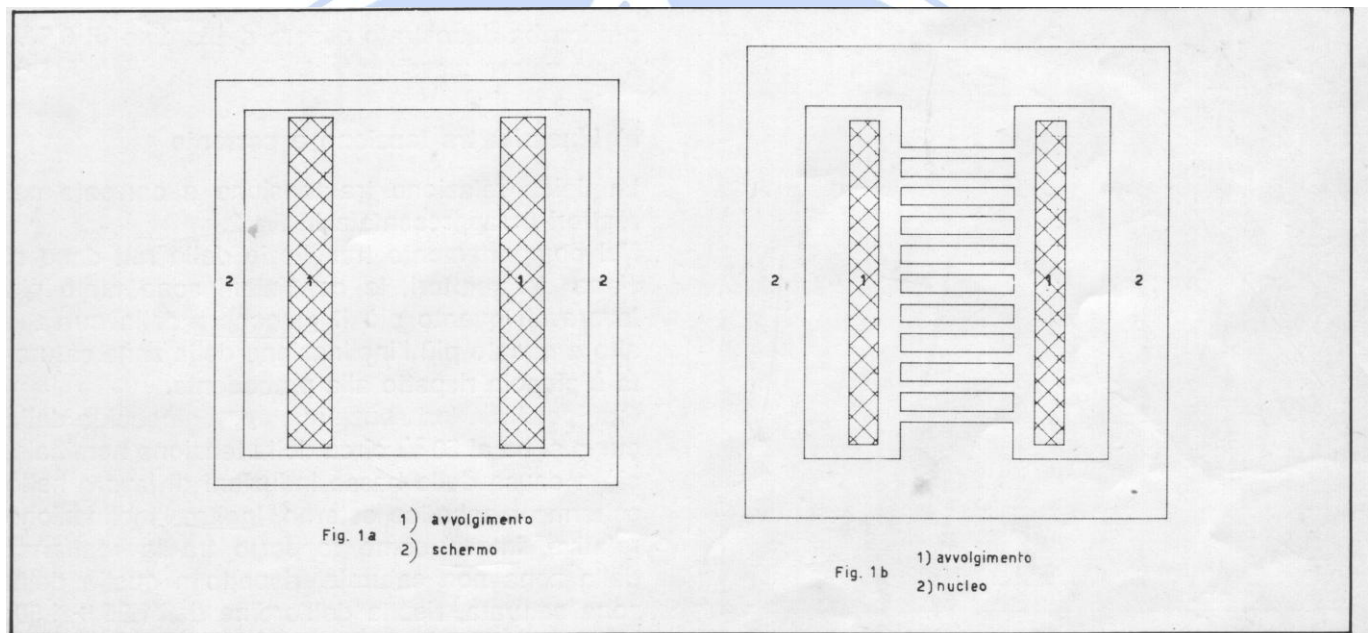
- 1.1 El reactor conectado en serie con las líneas de transmisión o el neutro de una máquina, se aplica principalmente para:
- 1.1.1 Aumentar la impedancia aguas abajo de su punto de inserción, limitando en forma efectiva la corriente de cortocircuito y mejorando la respuesta a fenómenos transitorios.
 - 1.1.2 Aparear la impedancia de líneas de alimentación en paralelo.
 - 1.1.3 Compensar la energía capacitiva de las líneas.
- 1.2 En este artículo, nos limitaremos a las aplicaciones de los reactores sumergidos en aceite para las aplicaciones de limitar la potencia de cortocircuito y/o apareamiento de impedancias, y del tipo sumergido en aceite.
- 1.3 Estas unidades también pueden estar incluida dentro del mismo tanque del transformador, ó como una unidad independiente, sin modificar sustancialmente las dimensiones de los arrollamientos ni de la parte activa, y con sólo una ligera influencia en las pérdidas totales del transformador, conectarse en serie a los bornes exteriores del arrollamiento deseado del transformador
- 1.4 En consecuencia, estos aparatos introducen la energía reactiva necesaria en el punto más favorable, permitiendo utilizar unidades de alta potencia que operen en forma ventajosa económicamente sobre un rango operativo amplio, y de reducir además el precio del transformador si la mayor reactancia fuera parte intrínseca de su parte activa.

2. PRINCIPIOS DE DIMENSIONAMIENTO.

- 2.1 La potencia de un reactor es para una frecuencia dada, proporcional a la energía almacenada en el arrollamiento, en su circuito magnético, y particularmente en el entrehierro.
- 2.2 Resulta por lo tanto evidente la necesidad del proyectista de utilizar en el circuito magnético del reactor los materiales con permeabilidad relativa igual a uno. Sin embargo, se puede elegir entre un circuito magnético de alta densidad de flujo y de pequeño volumen, y otro de baja densidad de flujo y gran volumen, siempre dentro del rango técnicamente aceptables de intensidad de campo magnético, pérdidas, sobre temperaturas, sollicitaciones dieléctricas y esfuerzos electrodinámicos.
- 2.3 Desde un punto de vista constructivo, existen por lo tanto tres diferentes tipos de reactores sumergidos en aceite, representados en las versiones monofásicas en las figuras 1a y 1 b.
- 2.4 El reactor de la figura 1 a, llamado de ***apantallado magnetostático***, tiene un único entrehierro correspondiente a la altura de la ventana de la ventana del apantallado magnetostático, medido en el exterior del arrollamiento, se emplea en serie con los devanados de los transformadores para limitar las corrientes de cortocircuito, como

se trata en este caso, y también para los reactores en derivación propios de los sistemas de transmisión.

- 2.5 El reactor de la figura 1 b, llamado de núcleo con **entrehierros distribuidos**, tiene un circuito magnético similar al del transformador, con la diferencia que se distribuyen los entrehierros de manera definida por el cálculo a lo largo de la columna, y se emplea en el caso de los reactores en derivación propios de los sistemas de transmisión.
- 2.6 Existe un tercer tipo, sin parte magnética alguna, consistente en la bobina de reactancia, que, por sus dimensiones y cifra de pérdidas, comparadas con las de los dos tipos anteriores, prácticamente ha dejado de utilizarse.



Figuras 1 a) y 1 b).

Representación esquemática de reactores: 1 a) Reactor con apantallado magnetostático; 1b) Reactor con entrehierros distribuidos.

- 2.7 Este tipo de núcleo consiste en “tortas” de hojas de laminación de material magnético, normalmente tipo M 5, de 0,3 mm de espesor, dispuestas en forma radial y de distinta longitud radial, adheridas entre sí por medio de resinas sintéticas especiales, para formar una disposición circular, y con un diámetro interior determinado por el tensor de apretamiento a aplicar, rectificadas cada una de ellas con precisión de micrones, y separado por entrehierros formados por espaciadores de materiales cerámicos sinterizados suministrados en dimensiones calibradas a la centésima de mm.
- 2.8 Inconvenientes propios del reactor tipo núcleo, y que en algunos casos puede resolverse actualmente con precisas técnicas de cálculo y de procesos de fabricación, son:

- Las corrientes iniciales de inserción y los esfuerzos electrodinámicos proporcionales a la segunda potencia de estas y que de ellas se derivan, son

notablemente superiores en reactores con entrehierros distribuidos, como consecuencia de un mayor nivel de inducción nominal de operación.

- Como consecuencia de ello, las precauciones para asegurar la estabilidad estructural de los devanados y las cargas a aplicar a los devanados son mucho más críticas para asegurar un nivel bajo de vibraciones.
- La presencia del entrehierro en el circuito magnético, implica la presencia de importantes componentes transversales de flujo magnético, que pueden significar sobre temperaturas en las laminaciones próximas al entrehierro y en los devanados, dando lugar a apariciones “Hot Spot”, con efecto deletéreo para las aislaciones sólidas, tanto es así, que la distancia mínima entre el arrollamiento y el núcleo para determinadas tensiones, (BIL 550 kV, como en el presente caso), no sólo está determinada por consideraciones dieléctricas sino también de las componentes transversales de flujo.
- Para determinadas condiciones del sistema eléctrico, las exigencias de linealidad de hasta 1,6 P.U., pueden hacer que en el comportamiento transitorio y para las inducciones económicas de diseño se llegue a la saturación del núcleo.
- La utilización de elevada cantidad de material magnético y elevadas inducciones, unidos a una alta densidad de energía, contribuye a la existencia de una corriente de neutro relativamente alta.
- La distribución de las sobretensiones de impulso atmosférico es notablemente peor, por la alta capacidad a tierra propia de estos devanados.

3. **CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS.**

3.1 ***Linealidad entre tensión y corriente.***

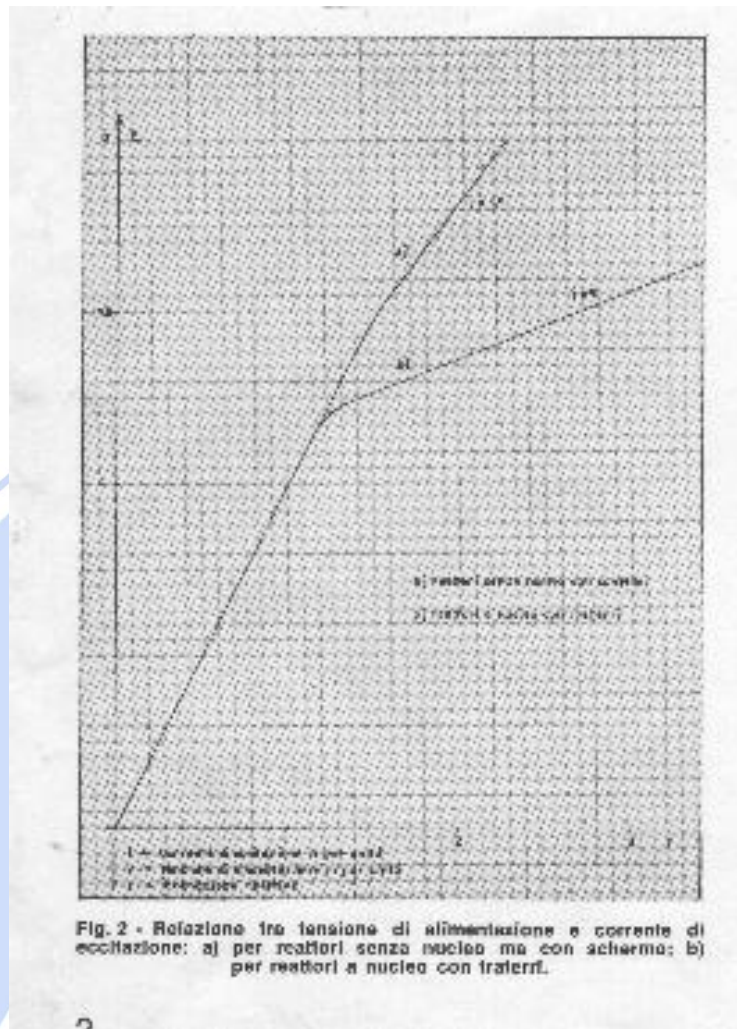


Figura 2. Relación entre la tensión de alimentación y de corriente de excitación: a) para el caso de reactor con apantallado magnetostático, b) para el reactor con entrehierros distribuidos en el circuito magnético.

- 3.1.1 La típica relación entre corriente y tensión está representada en la figura 2.
- 3.1.2 En el comportamiento transitorio del sistema eléctrico donde están insertados los reactores, las condiciones serán tanto más favorables cuanto más alejado este el nivel de inducción de trabajo del codo de saturación, y cuanto menor es el ángulo determinado por la inclinación relativa (i) de la recta de saturación con respecto a la de la zona que le precede.
- 3.1.3 En el caso del reactor sin núcleo, el codo de la curva está en nuestro caso cerca de 3,33 veces la tensión nominal debido a la baja inducción (elegida entre otros motivos para aumentar la frecuencia propia del reactor.) presente en el apantallado magnetoestático.
- 3.1.4 Además, la inclinación relativa dada como el cociente entre la zona no saturada respecto de la saturada, resulta del orden del 1,5 a 2,5 como consecuencia del aumento de la reactancia debido a la presencia del apantallado.
- 3.1.5 Para el reactor elegido en nuestro proyecto, el índice es de $i = 2,44$.

4. PROBLEMAS DE CÁLCULO Y DE CONSTRUCCIÓN.

- 4.1 Para el proyecto de un reactor el conocimiento del campo magnético y del campo eléctrico es esencial.
- 4.2 La configuración del campo magnético depende fundamentalmente la forma impuesta al circuito magnético de apantallado, del que debe determinarse el ó los modos propios de vibración para el espectro de frecuencias de interés.
- 4.3 Daremos una introducción a la determinación de estos parámetros.
 - 4.3.1 **Campo magnético.**
 - 4.3.1.1 Para determinar la intensidad de campo magnético se recurre a las ecuaciones de Maxwell para un solenoide ideal.
 - 4.3.1.2 El solenoide real está simulado como un conjunto de reactores elementales de espesor despreciable, dispuestos concéntricamente uno con respecto al otro, y determinándose por medio de ábacos, de medios iterativos o por cálculo numérico avanzado la reactancia total, dependiendo el método de la importancia del reactor.
 - 4.3.1.3 La presencia del apantallado magnetostático se evalúa recurriendo al principio de superposición o al de imágenes.
 - 4.3.1.4 En la figura 3 a se representa el resultado del cálculo para un reactor supuesto en aire y en la figura 3 b, es visible el resultado del reactor completo dentro del apantallado magnetostático.

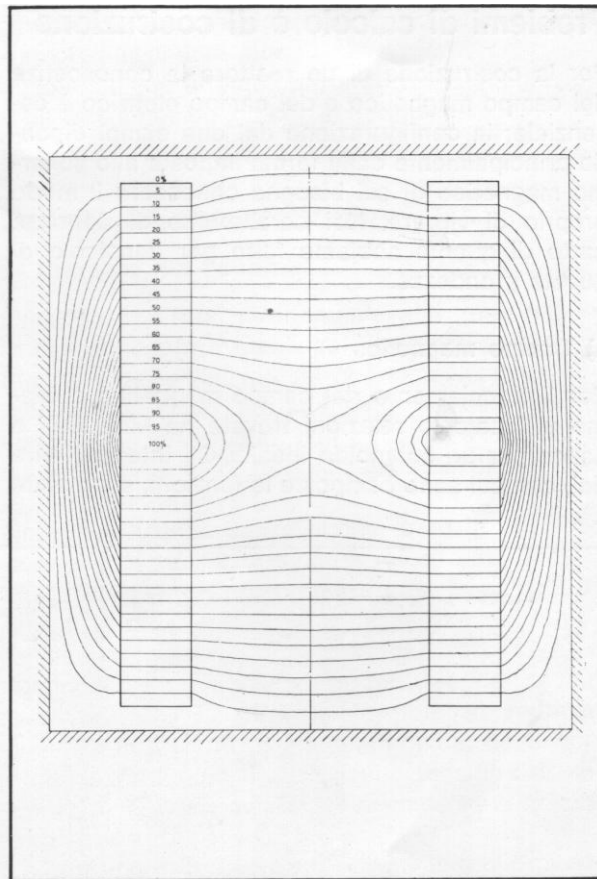
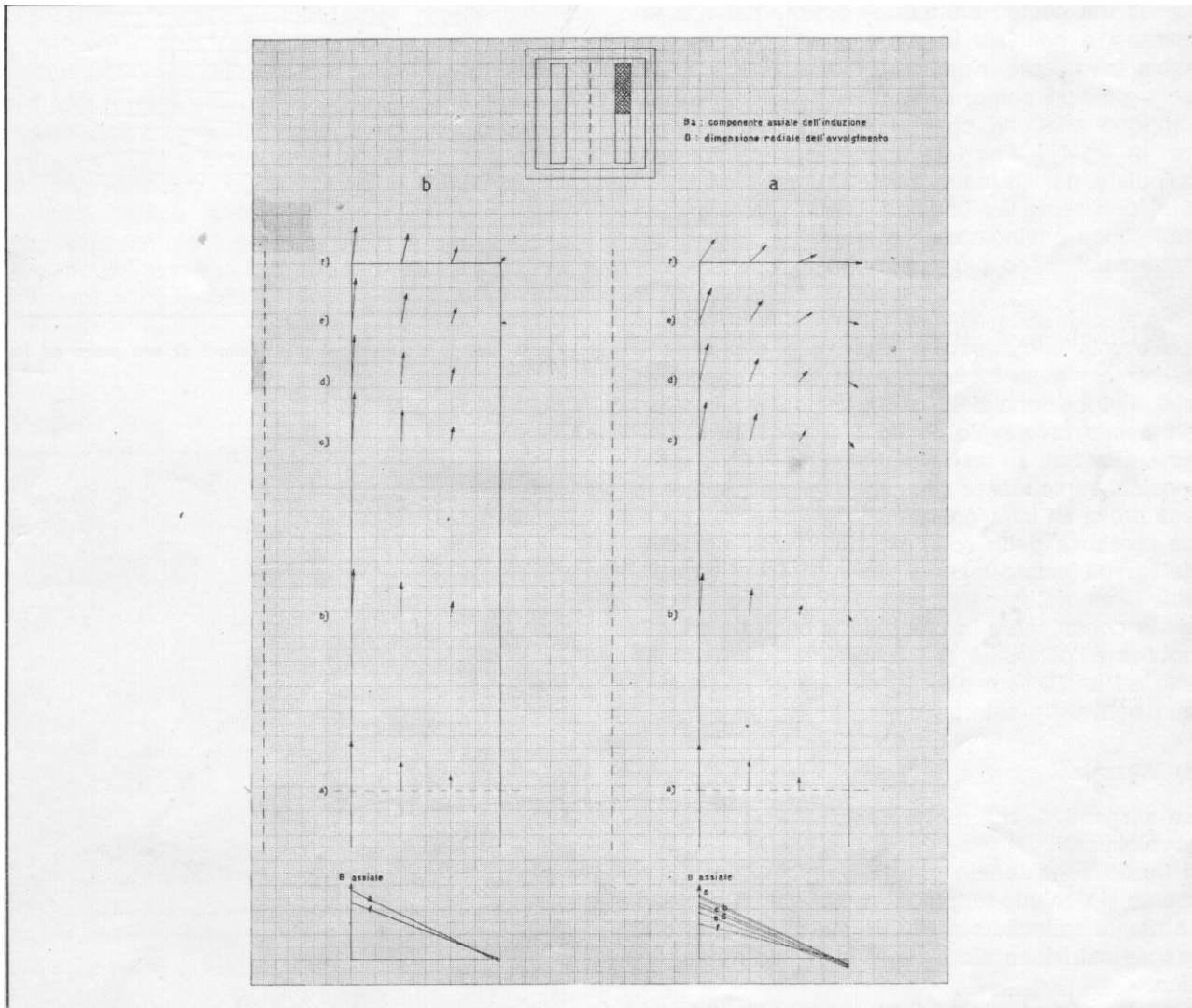


Figura 3: Campo de inducción magnética: a) para un reactor sin apantallado magnetostático; b) para un reactor con apantallado magnetostático. En la parte inferior de las figuras se representan las respectivas componentes axiales de la inducción asociadas con las diferentes alturas a); b); c); d) y en función de su posición radial en el arrollamiento.

- 4.3.1.5 Del análisis de la variación del campo magnético entre los dos casos, se nota que la presencia del apantallado magnetostático hace que prácticamente el flujo tenga sólo componentes axiales y que las componentes de campo magnético transversal, que aumenta notablemente las pérdidas adicionales en ambos extremos del devanado, son casi inexistentes.
- 4.3.1.6 Esto implica la ventaja de aumentar de un 25 % a un 50 % la reactancia y de reducir las pérdidas adicionales por flujo transversal, permitiendo utilizar conductores de escasas dimensiones radiales y eliminando los puntos calientes (“Hot Spot”) en los devanados, muy importante para máquinas destinadas a operar continuamente a potencia nominal al ser conectadas a la red, además de reducir los esfuerzos axiales de compresión por esfuerzos electrodinámicos, reducidos sólo a los derivados de las componentes axiales de flujo

Figura 4. Distribución inicial de impulso típica en un reactor con devanados de alta capacidad serie.



4.3.2 **Campo y gradientes eléctricos.**

- 4.3.2.1 Para la determinación del campo eléctrico dentro del arrollamiento, se utilizan los mismos métodos aplicables al transformador, y básicamente consiste en calcular las componentes axiales y radiales para las distintas solicitaciones dieléctricas supuestas, resolviendo las ecuaciones que corresponden a los diferentes estados en el tiempo, siendo normalmente y para los casos como los del reactor que nos ocupa, la más importante la que corresponde a la distribución inicial del impulso.
- 4.3.2.2 En nuestro caso, aplicamos el método de las cargas, y en la figura 4 se representa la distribución inicial de impulso en un reactor con devanados de alta capacidad serie.
- 4.3.2.3 Este conocimiento exacto, si bien no es crítico para un reactor cuyo BIL es de 170 kV, se torna esencial para BIL 950 y superiores para determinar la estructura aislante más oportuna.

- 4.3.2.4 La capacidad serie se obtiene por diferentes tecnologías, según sea la potencia y la tensión de la unidad.
- 4.3.2.5 Para los casos simples como el presente, se recurre al tipo de doble disco ó al doble disco de espiras intercaladas elaborado con conductor simple, pero para unidades de elevadas potencias y tensiones, puede recurrirse al tipo de espiras pantalla, con conductor traspuesto.
- 4.3.2.6 A la distribución casi lineal de las sobretensiones de impulso atmosférico, tan favorable, y que significa prácticamente que a lo largo de todo período transitorio del fenómeno las tensiones contra masa no superen las del BIL de ensayo contribuye de forma decisiva la muy baja capacidad paralelo del arrollamiento, por carecerse de núcleo.
- 4.3.2.7 En la figura 5 se representa las máximas solicitaciones respecto de tierra desarrolladas a lo largo del devanado para la duración completa del fenómeno de impulso, es decir de la distribución inicial, el período transitorio y la distribución inductiva final.

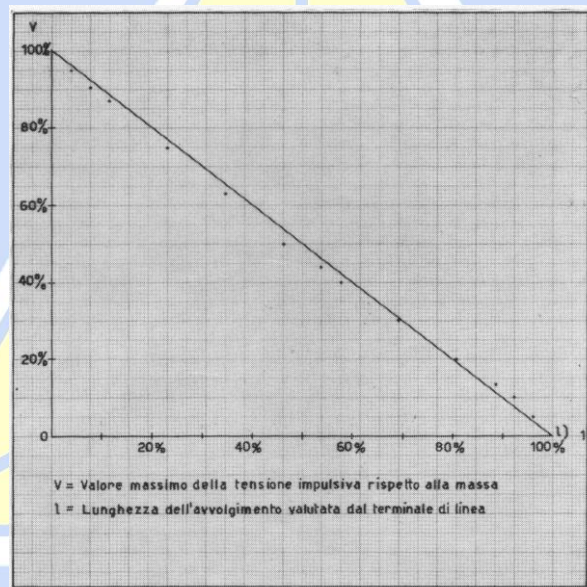


Figura 5. Tensión con respecto a masa y a lo largo de la altura axial del arrollamiento de un reactor medida durante un ensayo de impulso efectuado con ondas recurrentes de baja tensión y comparada con una distribución lineal de tensiones de impulso.

- 4.3.2.7 La presencia del apantallado magnetostático, próximo a los extremos del arrollamiento, mantiene prácticamente paralelas las líneas de flujo, por lo que la diferencia de tensión concatenada entre las espiras correspondientes a un disco central y el correspondiente a las espiras de un disco de los extremos es despreciable.

5. DISPOSICIONES CONSTRUCTIVAS.

- 5.1 Para las unidades monofásicas, cada unidad tiene su parte activa y el propio tanque, con los accesorios correspondientes.

- 5.2 Para el caso de unidades trifásicas, en un mismo tanque principal se disponen los tres partes arrollamientos iguales entre si y se presentan:
- Tres unidades monofásicas con independientes apantallados magnetostáticos.
 - Una apantallado magnetostático en la región superior e inferior de las bobinas común a los tres arrollamientos
 - Una apantallado magnetostático en la región superior e inferior de las bobinas común a los tres arrollamientos con columnas laterales de retorno.
- 5.3 *A título de referencia, para esta unidad monofásica de J 6 Ohm, 50 Hz, 19,099 mH, 550 A RMS, con incremento de temperatura del devanado de 65 ° K y 11 kA de cortocircuito térmico durante 5 segundos (Valores especificados sumamente exigentes para un reactor de estas características) se ha elegido un devanado en discos, y para asegurar su resistencia a los esfuerzos electrodinámicos, se elaborara con conductor continuamente transpuesto impregnado en resina epoxídica en estado “B”, que luego del tratamiento de secado y aplicación de cargas axiales de compensación de esfuerzos de cortocircuito, resulta polimerizado formando un único conductor de elevado módulo resistente. La sección del conductor se corresponde con una densidad de corriente menor a 1,7 A/ mm².*
- 5.4 *Su aislación será de papel KAFT FIBRAS LARGAS de pura celulosa, mejorado térmicamente por adición de diciandiamida con contenido mínimo de 1,8 %de N₂.*
- 5.5 *El arrollamiento por tener pocas espiras por disco resulta con muy baja capacitancia seri asegurando linealidad para las solicitudes transitorias con frente de corta duración.*
- 5.6 *El cálculo de esta unidad optimizado para sus parámetros de dimensionado se corresponde con 200 espiras de devanado.*
- 5.7 *El diámetro medio del arrollamiento es de 800 mm, con una altura total de 1100 mm.*
- 5.8 *La parte activa que lo contiene tiene una altura de 1550 mm y un peso de 10000 Kg, y el peso total por unidad es de 15500 Kg.*
- 5.9 *El apretamiento se efectuará a través de tensores laterales de acero con continua compensación de su altura por un conjunto de arandelas cónicas según la norma DIN.*
- 5.10 *Este arreglo permite asegurara a lo largo del tiempo su resistencia a las solicitudes electrodinámicas propias de su servicio*

Ing David Ponce Vall.